

На правах рукописи

Собянина Ольга Николаевна

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ПУТЕЙ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ  
ВЫПЛАВКИ ЧУГУНА ИЗ ТИТАНОМАГНЕТИТОВОГО СЫРЬЯ**

Специальность 05.16.02 – Metallургия черных, цветных и редких металлов

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2013

Работа выполнена на кафедре «Металлургия железа и сплавов» ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

**Научный руководитель:** доктор технических наук, профессор  
Загайнов Сергей Александрович

**Официальные оппоненты:** Кобелев Владимир Андреевич,  
кандидат технических наук,  
ОАО "Уральский институт металлов",  
заведующий НИЦ подготовки сырья  
и рудотермических процессов

Боковиков Борис Александрович  
доктор технических наук,  
ООО «Научно-Производственное  
Внедренческое Предприятие ТОРЭКС»  
заместитель генерального директора  
по науке и главного специалиста

**Ведущая организация:** ФГБУН Институт металлургии  
Уральского отделения РАН

Защита диссертации состоится 11 октября 2013г. в 15:00 на заседании диссертационного совета Д 212.285.05 на базе ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, Зал ученого совета Металлургического факультета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина».

Автореферат разослан 10 сентября 2013г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
доктор технических наук,  
профессор

Карелов С.В.

## **Общая характеристика работы**

**Актуальность работы.** Мировая тенденция развития металлургии такова, что происходит быстрое истощение запасов железорудного сырья, поэтому возникает острая необходимость перехода в ближайшем будущем на использование комплексных руд сложного состава. К таким рудам относятся титаномагнетиты, имеющие широкое распространение и огромные запасы в недрах земли.

Плавка на высокотитанистой шихте — одна из самых трудных в практике доменного производства, т.к. наряду с компактными массами чугуна и шлака в печи образуются малоподвижные конгломераты из коксовой мелочи, металла, шлака и карбонитридов. В связи с этим ухудшается фильтрация расплавов, увеличиваются потери металла, возрастает перепад давления газа в нижней части печи и снижается ее производительность. В условиях доменной плавки на ОАО «ЕВРАЗ Нижнетагильский металлургический комбинат» (ОАО «ЕВРАЗ НТМК») содержание оксида титана в шихте составляет 48 — 50 кг на 1 т чугуна, что почти в два раза превосходит максимально допустимое количество титана в шихте на металлургических заводах других стран, например Японии. В перспективе содержание титана в шихте будет расти (разработка Качканарского месторождения).

Значительный объем исследований в области комплексной переработки титаномагнетитовых руд выполняли и выполняют ИМЕТ УрО РАН, ИМЕТ им. А.А. Байкова РАН, ЦНИИчермет им. И.П. Бардина. Данные исследования показали, что основная сложность выплавки ванадиевого чугуна связана с наличием титана в шихтовых материалах, который в условиях доменной печи восстанавливается до карбидов и карбонитридов, которые имеют высокую температуру плавления. Существенный вклад в разработке теоретических основ и решении проблем, связанных с извлечением ванадия и титана, внесен Уральским институтом металлов (УИМ). Институт занимается этими вопросами с 1954 года совместно с научными лабораториями ОАО «ЕВРАЗ НТМК» и в течение многих лет является ведущей организацией в черной металлургии нашей страны по данному направлению.

В 2005-2006 годах была проведена реконструкция доменных печей ОАО «ЕВРАЗ НТМК». Диссертационная работа содержит результаты мероприятий 2006-2012 годов, направленных на совершенствование технологии выплавки ванадиевого чугуна с целью повышения производительности доменных печей и снижения рисков, связанных с образованием карбидов титана.

**Целью диссертационной работы** является научное обоснование и оценка эффективности мероприятий ОАО «ЕВРАЗ НТМК» по оптимизации

технологических режимов выплавки ванадиевого чугуна (свойства шихты, кокса, шлака, давление) и конструкции печи, которые оказывают значительное влияние на восстановительные и теплообменные процессы, протекающие в зоне повышенных температур и шлакообразования, с учетом перспективы развития производства и тенденции изменения сырьевых условий.

**Научная задача работы** заключается в разработке методики анализа проведения титана в доменной печи (с использованием математических расчетов и ЭВМ), которая включает в себя уточненный способ термодинамического и кинетического анализа восстановительных процессов во взаимосвязи с теплообменом между шихтой и газом по высоте нижней зоны печи с учетом ее конструкции и тенденции роста содержания титана в шихтовых материалах.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

1. выявить доминирующие факторы и их количественное влияние на термодинамику и кинетику реакций восстановления титана из оксида;
2. усовершенствовать модель теплового состояния нижней зоны доменной печи с целью применения ее к анализу влияния свойств шлака, кокса, давления и конструкции печи на процесс карбидообразования;
3. оценить эффективность основных мероприятий по изменению технологических режимов работы существующих доменных печей и проектированию новых печей.

**Научная новизна.** Разработан новый подход к анализу работы доменных печей выплавляющих чугун из титаномagnetитового сырья, который основан на совместном решении задачи теплообмена и кинетики реакций восстановления титана из оксида.

Усовершенствована модель теплового состояния доменной печи в системе газ-кокс-шлак-чугун.

На основе нового подхода к оценке развития реакций восстановления разработаны алгоритмы решения технологических задач и получены количественные зависимости, учитывающие влияние свойств шихты, шлака, кокса, давления в печи и ее конструкции на процесс карбидообразования.

**Практическая значимость.** Предложенная методика позволяет решать широкий круг технологических задач, возникающих при переработке титаномagnetитового сырья в существующих доменных печах и определить рациональный профиль новых доменных печей, что дает возможность устранить проблемы, связанные с карбидообразованием. Методы анализа (математическое моделирование с использованием производственных данных и построение графических зависимостей) влияния профиля печи на нагрев продуктов плавки могут быть использованы при реконструкции доменных печей выплавляющих чугун из классических руд.

### **На защиту выносятся:**

1. Математическое описание проведения титана в доменной печи во взаимосвязи с теплообменом между шихтой и газом по высоте нижней зоны печи с учетом ее конструкции.
2. Результаты оценки влияния свойств шлака, кокса, давления и конструкции печи на тепловое состояние нижней зоны доменной печи, термодинамику и кинетику реакций образования кремния и карбида титана;
3. Методы анализа поведения титана в доменной печи и предполагаемые результаты их реализации в промышленных условиях с целью снижения рисков, связанных с карбидообразованием.

**Апробация работы.** Материалы диссертации докладывались и обсуждались на Международной конференции, посвященной улучшению качества транспортного металла, 4-6 декабря 2007, Нижний Тагил, Россия; Третьей международной конференции «Трансмет-2007» «Современные технологии производства транспортного металла», ноябрь 2008, Екатеринбург, Россия; Международной научно-практической конференции «Повышение качества образования и научных исследований» в рамках VII Сатпаевских чтений, 10-12 апреля 2008, Экибастуз, Россия; Восьмой научно-практической конференции «Новые перспективные материалы, оборудование и технологии для их получения» и Шестой научно-практической конференции «Современные технологии в области производства и обработки цветных металлов», 10-13 ноября 2009, Москва, Россия; Международной научно-практической конференции, 18-21 сентября 2012, Екатеринбург, Россия; Technological solutions' for intensive production of low silicon hot metal in blast furnace processing vanadium containing titania-magnetite, Technical contribution to the 6th International Congress on the Science and Technology of ironmaking – ICSTI, 42nd International Meeting on ironmaking and 13th International Symposium on iron Ore, October 14th to 18th, 2012, Rio de Janeiro, RJ, Brazil.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 14 научных статей, в том числе 2 статьи в рецензируемых журналах, рекомендуемых ВАК.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа изложена на 127 страницах машинописного текста, включая 70 рисунков, 7 таблиц, 74 формулы и состоит из введения, 3 глав, заключения, библиографического списка из 89 источников отечественных и зарубежных авторов.

## Основное содержание работы

**Во введении** обоснована актуальность работы, поставлена цель и сформулированы задачи исследования.

**В первой главе** диссертации рассмотрены вопросы значимости ванадийсодержащих титаномагнетитовых руд как перспективного металлургического сырья. На основе литературных данных рассмотрена история развития и основные проблемы доменной плавки, возникающие при комплексной переработке высоко титанистого сырья. Приведены основные достижения ОАО «ЕВРАЗ НТМК» в совершенствовании технологии производства ванадиевого чугуна. Отмечено, что современные условия переработки титаномагнетитового сырья требуют научное обоснование выбора тех или иных технологических параметров доменной плавки с учетом тенденции изменения сырьевых условий, которое включало бы в себя методики термодинамического и кинетического анализа поведения химических элементов в печи во взаимосвязи с теплообменными процессами.

**Во второй главе** осуществлен термодинамический и кинетический анализ восстановления титана и кремния в доменной печи с использованием известных физико-химических закономерностей поведения титана и кремния при выплавке чугуна из титаномагнетитового сырья. Усовершенствована модель теплового состояния нижней зоны доменной печи, т.е. области высоких температур в системе газ-кокс-шлак-чугун.

На основе нового подхода к оценке развития реакций восстановления разработаны алгоритмы решения технологических задач и получены количественные зависимости, учитывающие влияние свойств шихты, шлака, кокса, давления в печи и ее конструкции на процесс карбидообразования.

Термодинамический анализ условий восстановления титана из оксида при доменной плавке показал, что восстановление активно начинается выше температуры 1490К и наиболее вероятными являются реакции с образованием  $TiO$ ,  $TiC$ , а также  $Ti$  при взаимодействии  $TiO_2$  с углеродом в присутствии железа. Кремний приходит в печь с пустой породой железорудных материалов и с золой кокса в виде кремнезема –  $SiO_2$ . Восстановление кремния протекает по реакции прямого восстановления. После первой стадии монооксид кремния возгоняется и на коксовой насадке восстанавливается до металлического кремния, который растворяется в чугуне.

В таблице 1 приведены результаты расчета констант равновесия и равновесные концентрации продуктов реакций восстановления титана и кремния, а также равновесные парциальные давления газа  $CO$ , выделяющегося при образовании карбида титана и металлического кремния.

Таблица 1 – Термодинамические свойства реакций восстановления титана и кремния из оксидов при температуре 1753 К

№	Реакция	Константа равновесия реакции	Равновесная концентрация при давлении 0,41 МПа, %	Равновесное парциальное давление газа CO, МПа
1	$\text{TiO}_2 + \text{C} = \text{TiO} + \text{CO}$	4,14	0,22	17,40
2	$\text{TiO} + \text{C} = \text{TiC} + \text{CO}$	$3,31 \cdot 10^3$	4,04	3,40
3	$\text{SiO}_2 + \text{C} = \text{SiO} + \text{CO}$	$2,09 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-2}$	0,16
4	$\text{SiO} + \text{C} = \text{Si} + \text{CO}$	3,7	0,06	2,92

Необходимость снижения содержания титана в чугунах определяется его растворимостью, которая увеличивается с повышением его физического нагрева (температуры) и снижается по мере насыщения его кремнием.

На основе термодинамических расчетов получены зависимости равновесных концентраций титана, карбида титана и кремния от температуры и давления (рисунки 1 и 2).

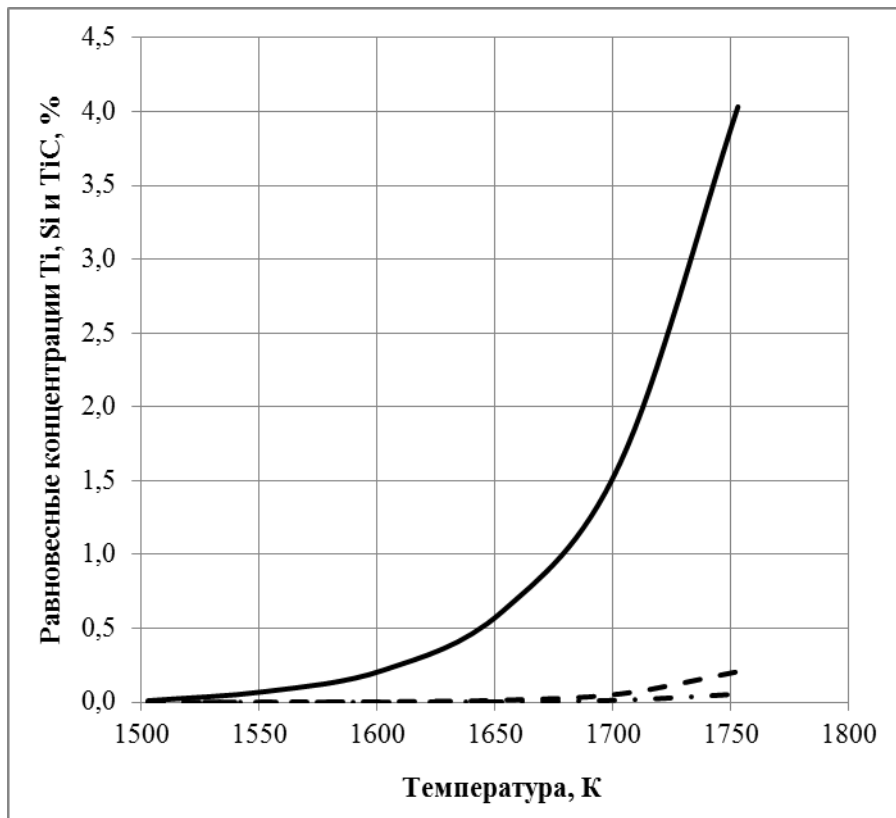


Рисунок 1 – Влияние температуры на равновесные концентрации TiC (—), Ti (---) и Si (- · - · -)

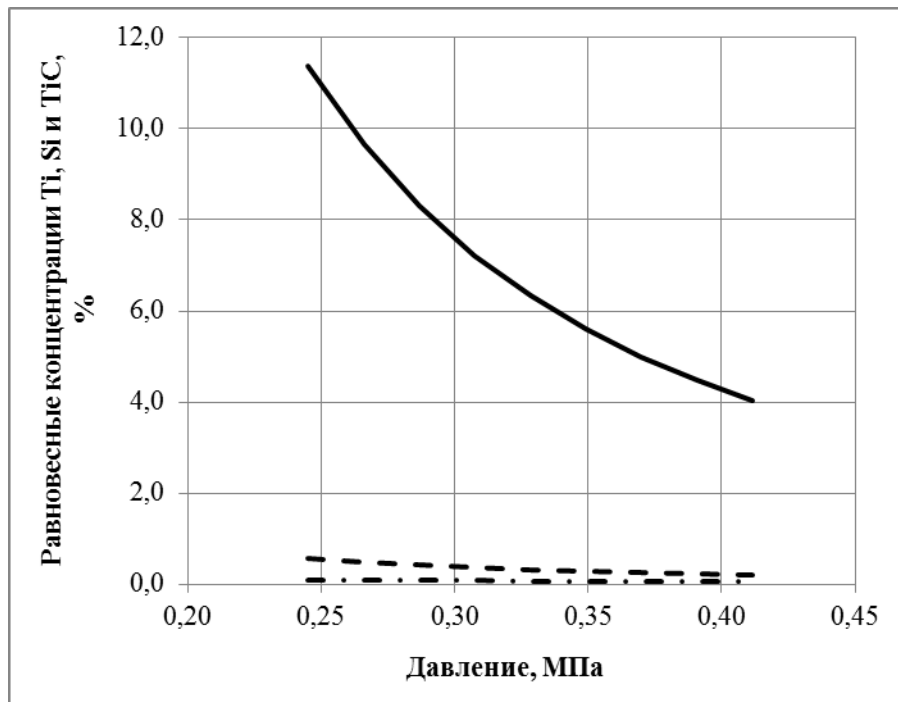


Рисунок 2 – Влияние давления на равновесные концентрации TiC (—), Ti (- · - · -) и Si (---)

Выше приведенные зависимости позволили представить взаимосвязь содержания кремния и титана в чугунах и сопоставить их с данными о работе доменной печи ОАО «ЕВРАЗ НТМК» (рисунок 3).

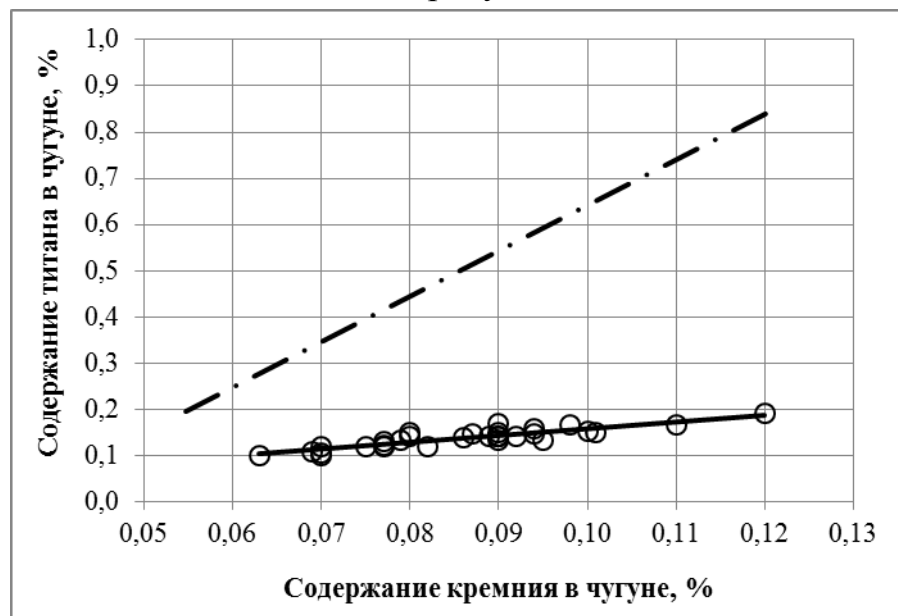


Рисунок 3 – Сопоставление расчетной (- · - · -) и фактической (—) зависимостей между содержанием титана и кремния в чугунах

Данные таблицы 2 и рисунок 3 показывают, что увеличение давления и снижение концентрации кремния способствуют уменьшению содержания титана в чугунах.



Таблица 2 – Производственные данные о работе доменных печей  
ОАО «ЕВРАЗ НТМК»

Показатели	ДП №3	ДП №1	ДП №6	ДП №5
Давление горячего дутья, ата	3,1-3,2	3,45-3,55	4,0-4,15	4,8-4,85
Содержание кремния в чугунае, %	0,12-0,13	0,1-0,11	0,08	0,065-0,07
Содержание титана в чугунае, %	0,20-0,25	0,20-0,25	0,15-0,18	0,12-0,18

При анализе влияния технологических факторов на процессы восстановления титана и образования его карбидов был осуществлен переход от равновесных концентраций продуктов реакций к парциальным давлениям газа СО ( $P_{CO}$ ). Это обусловлено тем, что на доменных печах измеряется давление дутья на фурмах и имеется возможность расчета фактического парциального давления СО. Кроме того, при проектировании доменных печей и выборе технологии выплавки чугуна имеется возможность изменять фактическое значение  $P_{CO}$ . Термодинамический анализ показал, что расчетное равновесное парциальное давление газа СО близко по значению к фактическому давлению на уровне фурм. Сопоставление величин фактического и равновесного давления газа СО позволяет сделать вывод о возможности протекания реакций.

Расчет равновесной концентрации титана и сопоставление ее с фактической показал, что восстановление титана определяется кинетикой процесса, а именно временем пребывания расплава в области повышенных температур. Данное заключение подтверждают практические данные о влиянии производительности доменной печи №6 ОАО «ЕВРАЗ НТМК» на соотношение содержания оксида титана в шлаке к содержанию титана в чугунае (рисунок 4).



Рисунок 4 – Влияние производительности доменной печи на восстановление титана при содержании кремния в чугунае меньше 0,9%

Формальная кинетика химических реакций позволяет оценить влияние времени на степень отклонения реакций от равновесия. Однако для решения этой задачи необходимо знать энергию активации процесса  $E$ , величина которой находится экспериментально. В связи с этим анализ влияния технологических факторов доменной плавки на процессы восстановления титана и кремния проводился в относительных координатах и рассматривалась зависимость изменения степени приближения фактической концентрации продуктов реакций к равновесной от времени:

$$\frac{(x-x_p)_\tau}{(x-x_p)_\delta} = \left( \frac{\tau}{\tau_\delta} \right)^{\frac{1}{1-n}}, \quad (1)$$

где  $\tau_\delta$  – время движения расплава в печи объемом 2000 – 2300 м<sup>3</sup> при базовых (фактических) условиях доменной плавки, с;

$\tau$  – время движения в печи с интересующим нас отношением высоты горна к его диаметру или прогнозных параметрах доменного процесса, с;

$x$  и  $x_p$  – фактическая и равновесная концентрации вещества, %;

$n$  – порядок реакции.

Выражение для времени движения расплава:

$$\tau = \frac{L}{\omega} = \frac{\pi}{2\omega} \left( \frac{1}{2} \sqrt{d_r^2 + h_r^2} + d_r \right), \quad (2)$$

где  $\omega$  – скорость фильтрации расплава, которая зависит от технологических параметров доменной плавки, м/с;

$d_r, h_r$  – диаметр горна и его высота, м.

Восстановительные процессы в доменной печи, характеризующиеся концентрационными полями, тесно связаны с теплообменными. Тепловое состояние печи является одним из основных факторов, определяющих удельный расход кокса, производительность и качество продуктов плавки.

В основе модели теплового состояния нижней зоны доменной печи, т.е. области высоких температур – выше 1490К, лежит система обыкновенных нелинейных неоднородных дифференциальных уравнений, описывающих температурные поля газа, кокса, шлака и чугуна по высоте нижней зоны печи (см. уравнения (3)-(6)). Численное интегрирование системы дифференциальных уравнений было выполнено методом Рунге-Кутты.

Дифференциальное уравнение для потока шлака:

$$\frac{dT_{III}}{dh} = \frac{\alpha_{\Sigma v} S \{ (T_r - T_{III}) - 2(T_{III} - T_K) - (T_{III} - T_q) \} + Q_{хим}}{W_{III}}, \quad (3)$$

для потока газа:

$$\frac{dT_{\Gamma}}{dh} = \frac{\alpha_{\Sigma v} S \{ (T_{\Gamma} - T_{\text{ш}}) + (T_{\Gamma} - T_{\text{к}}) + (T_{\Gamma} - T_{\text{ч}}) \}}{W_{\Gamma}}, \quad (4)$$

для потока кокса:

$$\frac{dT_{\text{к}}}{dh} = \frac{\alpha_{\Sigma v} S \{ (T_{\Gamma} - T_{\text{к}}) + 2(T_{\text{ш}} - T_{\text{к}}) - (T_{\text{к}} - T_{\text{ч}}) \}}{W_{\text{к}}}, \quad (5)$$

для потока чугуна:

$$\frac{dT_{\text{ч}}}{dh} = \frac{\alpha_{\Sigma v} S \{ (T_{\Gamma} - T_{\text{ч}}) + (T_{\text{к}} - T_{\text{ч}}) + (T_{\text{ш}} - T_{\text{ч}}) \}}{W_{\text{ч}}}, \quad (6)$$

где  $T_{\text{ш}}$ ,  $T_{\Gamma}$ ,  $T_{\text{к}}$ ,  $T_{\text{ч}}$  – температуры шлака, газа, кокса и чугуна, К;

$h$  – высота печи, м;

$\alpha_{\Sigma v}$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>3</sup>·К);

$S$  – сечение горна доменной печи, м;

$D$  – диаметр горна, м;

$W$  – теплоемкость, Дж/(кг·К).

**В третьей главе** приведены результаты анализа влияния различных факторов на тепловое состояние нижней зоны печи и процесс восстановления титана и кремния из оксидов.

Образование титана протекает в интервале температур, максимальное значение которой достигается на выходе шлака из коксовой насадки, а минимальное определяется характером кривой зависимости константы равновесия реакции от температуры. На рисунке 1 показано, что восстановление начинается при температуре 1525 К. На протяженность зоны восстановления титана (высота температурного интервала между уровнем фурм и уровнем начала восстановления) существенное влияние оказывают технологические параметры плавки (давление в доменной печи, качество кокса, основность шлака) и конструкция доменной печи.

Сопоставление зависимостей протяженности зоны восстановления титана от технологических параметров доменной плавки и конструкции печи показал, что доминирующими факторами являются давление и качество кокса.

В меньшей степени на изменение зоны восстановления влияет основность шлака. Согласно современной технологии выплавки ванадийсодержащего чугуна она должна составлять 1,20-1,25ед. Увеличение основности выше данных значений снижает содержания железа в железорудной части шихты, вследствие этого увеличивается удельный выход шлака и удельный расход кокса.

Пределы уменьшения угла наклона заплечиков ограничены, т.к. сильное его изменение влияет на механическое воздействие расплава на кожух и футеровку доменной печи.

Анализ влияния *давления в доменной печи* на теплообменные процессы по высоте нижней зоны доменной печи выше уровня фурм во взаимосвязи с восстановительными показателем, что его повышение позволяет уменьшить прогрев шлака и кокса и, соответственно, равновесное парциальное давление газа СО, снизить содержание кремния и титана в чугуне.

На рисунке 5 показано влияние давления на изменение относительного равновесного парциального давления газа СО, образовавшегося в ходе реакции 2 в таблице 1  $\frac{p_i}{p_o}$  ( $p_i$  меняется в зависимости от общего давления в печи,  $p_o$  – постоянная величина при давлении равном 0,41МПа).

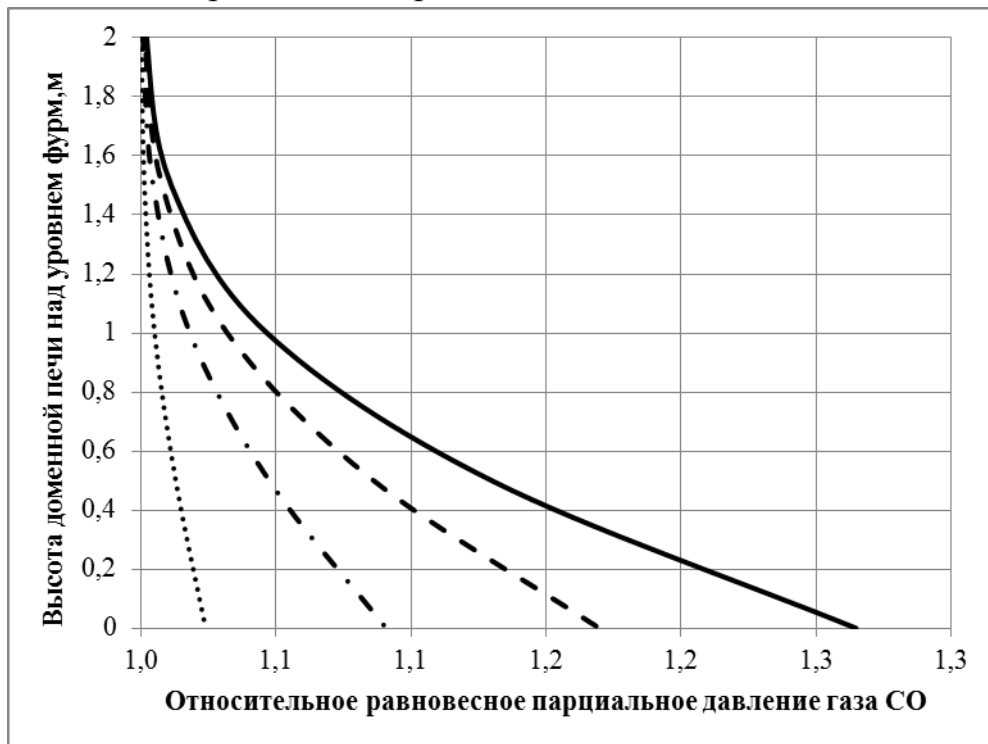


Рисунок 5 – Изменение относительного равновесного парциального давления газа СО по высоте доменной печи выше уровня фурм при следующих значениях давления: 0,25МПа(—), 0,29МПа(— — —), 0,34МПа(— · — · —), 0,39МПа (· · · ·)

На рисунке 6 представлена зависимость времени движения шлака основностью 1,2 от давления через коксовую насадку. Для наглядности результатов расчета использовано понятие относительного времени движения расплава –  $\frac{\tau_{p_i}}{\tau_{p_o}}$ , где  $\tau_{p_i}$  меняется в зависимости от давления  $p_i$ ,  $\tau_{p_o}$  – постоянная величина при давлении  $p_o=0,2$ МПа.

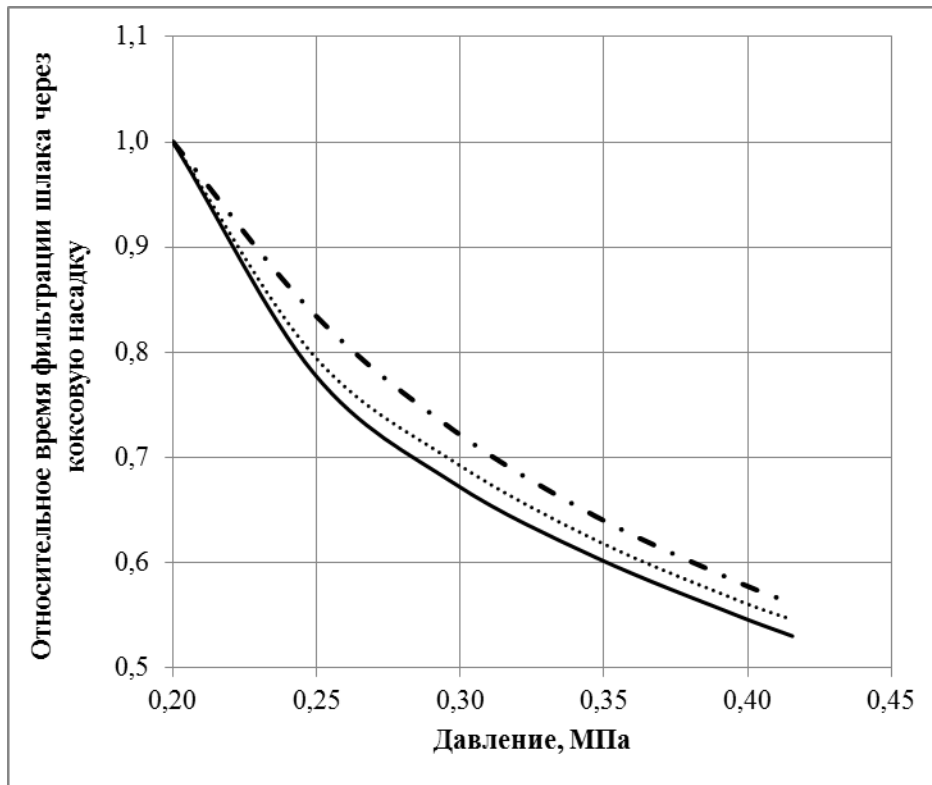


Рисунок 6 – Влияние давления на время движения шлака в горне доменной печи при следующих средних диаметрах кусков кокса:  
25 мм (—), 20 мм (····), 15 мм (- · - · -)

С увеличением давления скорость фильтрации шлака возрастает, время пребывания расплава в горне доменной печи уменьшается. Следовательно, содержания титана и его карбида в чугунах снижается. Отметим также следующее: чем крупнее куски кокса, тем значительнее влияние давления на скорость фильтрации.

Влияние давления на относительное отклонение фактической концентрации Si и TiC от равновесной —  $\frac{(x_p - x)_{p_i}}{(x_p - x)_{p_0}}$  при фракции кокса 15 мм и основности шлака 1,2 показано на рисунке 7. Относительное отклонение концентрации — это отклонение фактической концентрации от равновесной за время движения расплава  $\tau_i = f(p_i)$ , деленное на отклонение фактической концентрации от равновесной за период времени движения расплава при давлении  $p_0 = 0,2$  МПа.

С увеличением давления относительное отклонение фактической концентраций кремния и карбида титана от равновесной увеличивается. Причем изменение давления в большей степени влияет на концентрацию карбида титана.

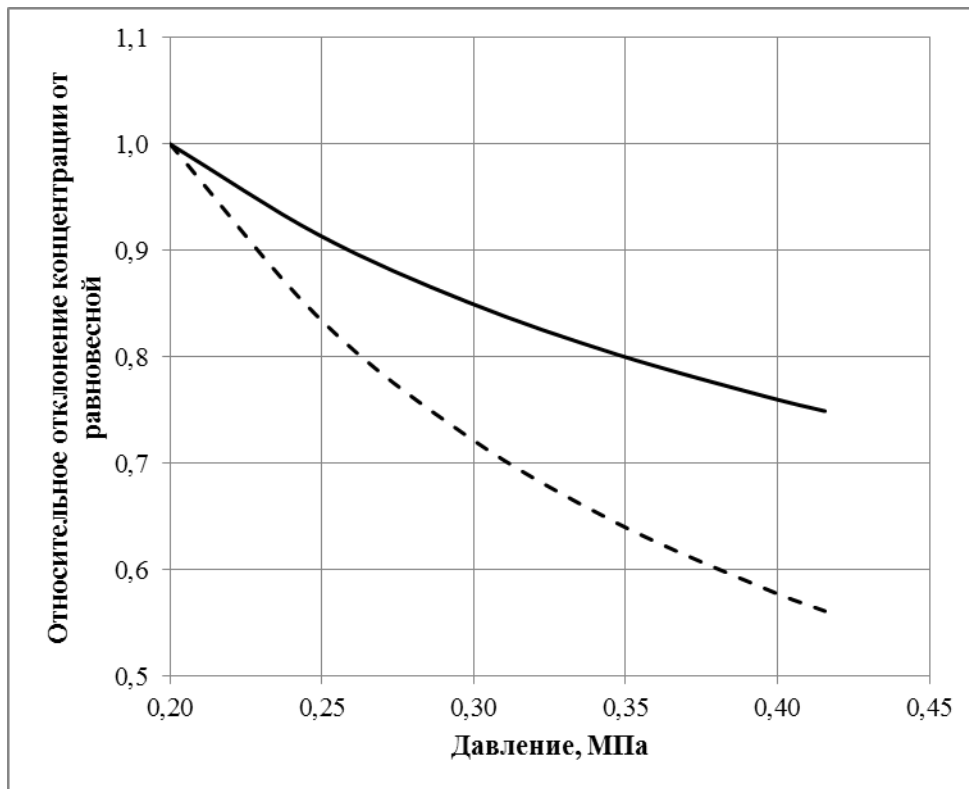


Рисунок 7 – Влияние давления на относительное отклонение концентрации Si (—) и TiC (---) от равновесной

Таким образом, изменение давления в доменной печи является существенной мерой для уменьшения процесса карбидообразования.

Полученные результаты подтверждаются промышленными данными о влиянии давления колошникового газа на соотношение содержания оксида титана в шлаке к содержанию титана в чугуна. С ростом давления оно увеличивается.

Анализ влияния качества кокса на теплообменные процессы во взаимосвязи с восстановительными осуществлен через анализ влияния **среднего диаметра кусков кокса**.

Увеличение среднего диаметра кусков кокса позволяет снизить температуру шлака при прочих постоянных технологических условиях и уменьшить равновесное парциальное давление газа CO. Вследствие этого уменьшается содержание кремния и, соответственно, титана в чугуна, снижается вероятность образования карбидных фаз.

На рисунке 8 показано влияние среднего диаметра кусков кокса на изменение относительного равновесного парциального давления газа CO, образовавшегося в ходе реакции 2 в таблице 1  $\frac{p_i}{p_o}$  ( $p_i$  меняется в зависимости от среднего диаметра кусков кокса,  $p_o$  – постоянная величина при среднем диаметре кусков кокса 30мм).

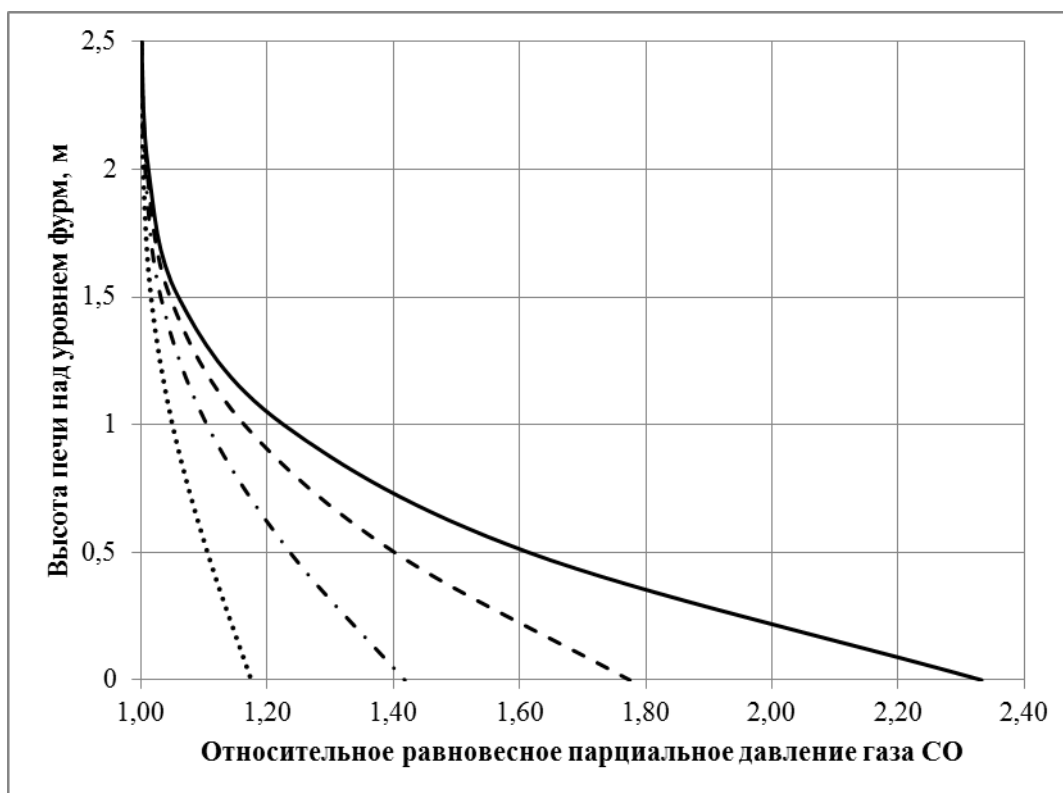


Рисунок 8 – Изменение относительного равновесного парциального давления газа CO по высоте доменной печи выше уровня фурм при следующих средних диаметрах кусков кокса:

10мм (—), 15мм (— · —), 20мм (· · · · ·), 25мм(·····)

Увеличение среднего диаметра кусков кокса позволяет увеличить скорость фильтрации шлака через коксовую насадку, что уменьшает вероятность образования карбидов титана из шлакового расплава.

Влияние размеров кусков кокса тем значительнее, чем больше угол наклона заплечиков доменной печи. С увеличением среднего диаметра кусков кокса время пребывания расплава в горне доменной печи сокращается, причем время тем меньше, чем уже горн печи при неизменной его высоте. При проектировании новых доменных печей необходимо повышать требования к качеству кокса, т.е. увеличивать его горячую прочность и снижать долю мелких фракций.

Чем ниже давление в печи, тем влияние размера кусков кокса на время пребывания расплава в горне доменной печи значительнее, что требует более тщательного выбора кокса по фракционному составу (рисунок 9).

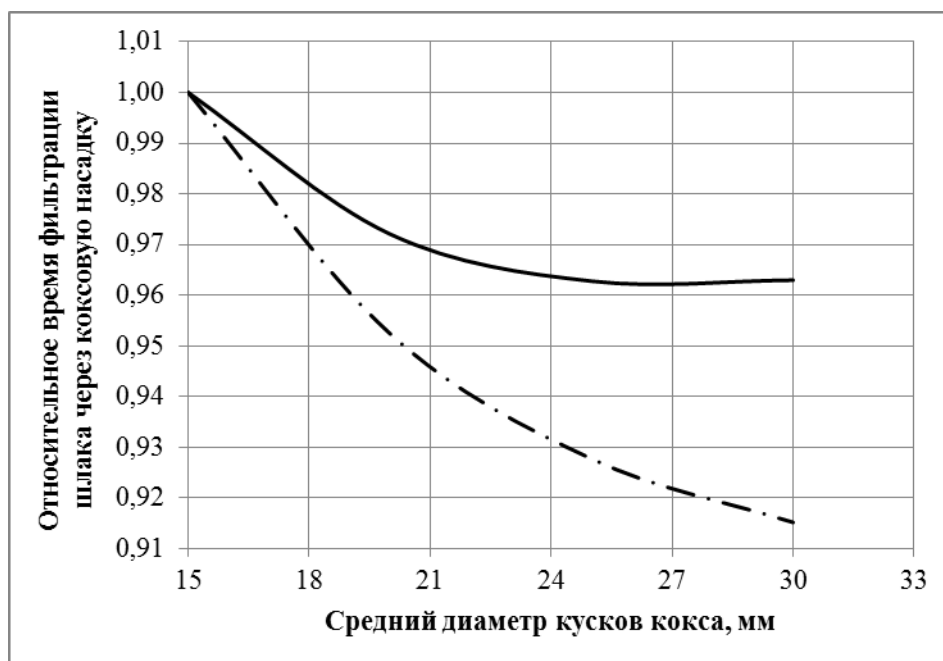


Рисунок 9 – Влияние среднего диаметра кусков кокса на время движения шлака в горне доменной печи при давлении: 0,25МПа (— · — · —); 0,41МПа (——)

На рисунке 10 показано влияние размера кусков кокса на относительное отклонение фактической концентрации Si и TiC в чугуна от равновесной.

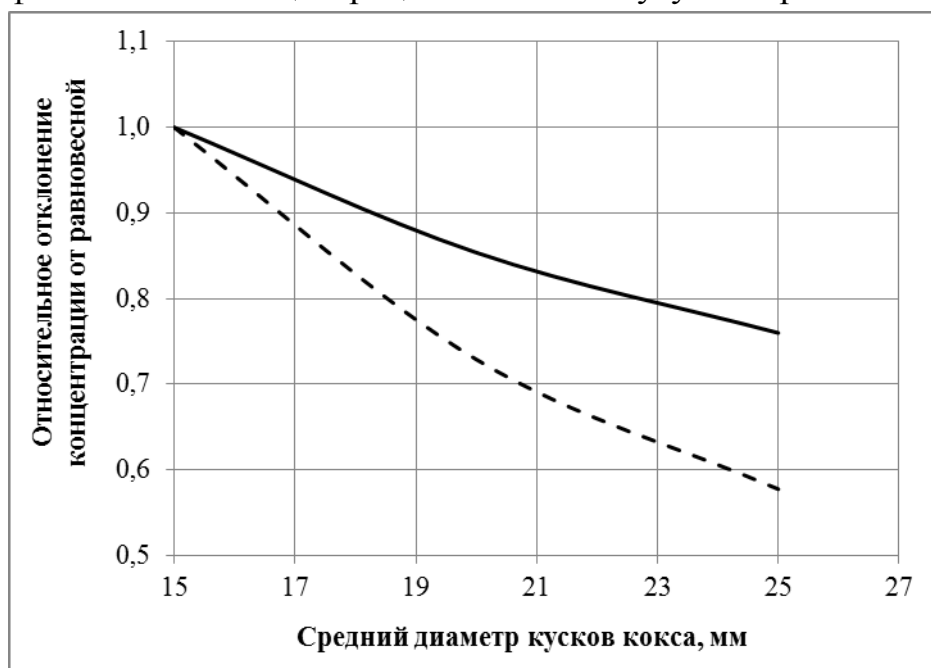


Рисунок 10 – Влияние среднего диаметра кусков кокса на относительное отклонение концентрации Si (——) и TiC (---) от равновесной

Полученные результаты расчетов подтверждаются промышленными испытаниями «горячей» прочности кокса (CSR) на соотношение содержания оксида титана в шлаке к содержанию титана в чугуна. С повышением CSR степень перехода титана в шлак увеличивается.



Анализ влияния **основности шлака** на теплообменные процессы во взаимосвязи с восстановительными показал, что ее увеличение несколько понижает температуру шлака и кокса и уменьшает равновесное парциальное давление газа CO. В результате этого снижается содержание кремния и титана в чугуне, уменьшается вероятность образования карбидных фаз.

С повышением основности шлака выше 1,15ед. его вязкость снижается. В результате увеличения жидкотекучести шлака скорость фильтрации шлака через коксовую насадку возрастает, а время его пребывания в горне сокращается.

На рисунке 11 представлена зависимость относительного времени  $\frac{\tau_i}{\tau_0}$  движения расплава в горне доменной печи (где  $\tau_i$  меняется в зависимости от основности шлака,  $\tau_0$  – постоянная величина при основности шлака  $CaO/SiO_2 = 1,11$ ед.) от основности шлака.

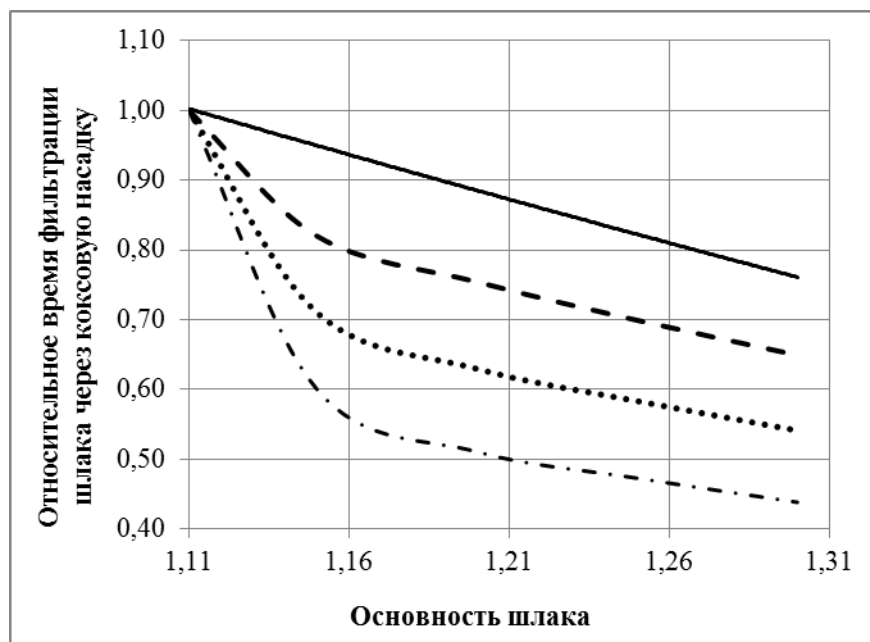


Рисунок 11 – Влияние основности шлака на время движения расплава в горне доменной печи при следующих соотношениях высоты горна к его диаметру:

0,42 (—), 0,45 (---), 0,49 (.....), 0,55 (-.-.-)

С увеличением основности шлака относительное отклонение фактической концентрации кремния и карбида титана от равновесной увеличивается. Причем изменение основности в большей степени влияет на концентрацию карбида титана.

Полученные результаты подтверждаются работой доменной печи №6 ОАО «ЕВРАЗ НТМК». С увеличением основности шлака содержание титана в чугуне снижается.

Анализ влияния **конструкции доменной печи** включает в себя анализ влияния угла наклона заплечиков на температурные поля газа, кокса, шлака и

чугуна и относительные парциальные давления газа  $\text{CO}$ , а так же анализ конструкции горна печи на относительное время пребывания расплава в горне и относительное отклонение концентрации кремния и карбида титана от равновесных значений.

Результаты расчетов показали, что уменьшение угла наклона заплечиков доменной печи позволяет снизить температуру шлака и равновесное парциальное давление газа  $\text{CO}$ , уменьшить содержание кремния и титана в чугуне.

Отметим, что изменение угла наклона заплечиков при прочих постоянных технологических условиях дает возможность менять температуру газа за счет изменения содержания кислорода в дутье с целью сохранения температуры шлака на заданном уровне. Эти меры позволяют уменьшить расход кокса и выход газа, необходимый для нагрева шлака до необходимой температуры.

На рисунке 12 приведены результаты анализа влияния конструкции горна доменной печи на относительное время движения расплава основностью 1,2 через коксовую насадку с гранулометрическим составом 15мм при давлении в печи 0,41МПа. Относительное время – отношение времени движения расплава в горне реконструированной доменной печи ОАО «ЕВРАЗ НТМК» к времени движения в горне базовой печи с соотношением высоты к его диаметру 0,34.

В целом при увеличении отношения высоты горна к его диаметру доменной печи время движения уменьшается, причем для шлаков низкой вязкости это изменение больше.

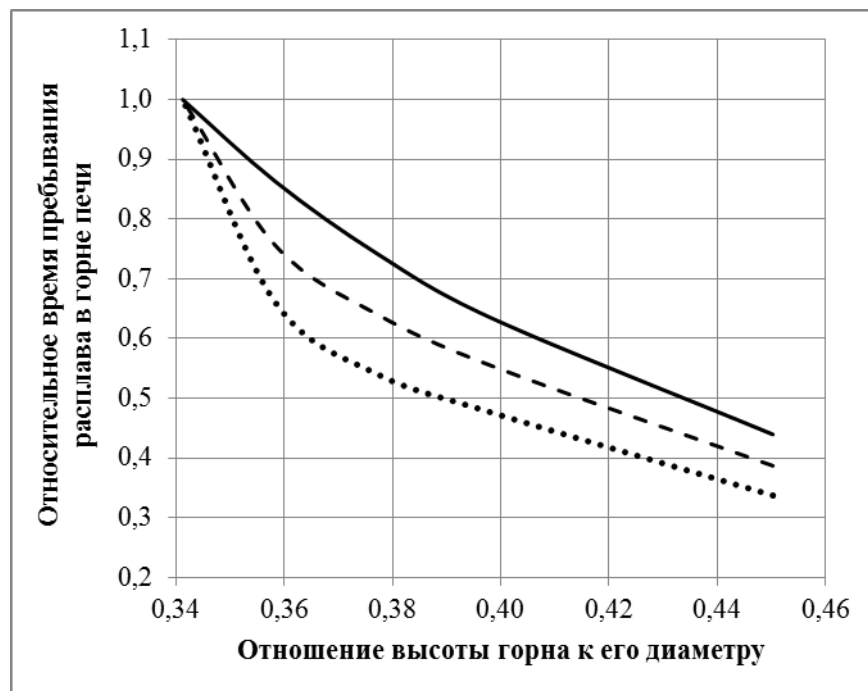


Рисунок 12 – Влияние конструкции горна доменной печи на время движения расплава через коксовую насадку при его вязкости:  
0,3 Па·с (.....), 0,35 Па·с (---), 0,4 Па·с (—)

На реконструированных доменных печах ОАО «ЕВРАЗ НТМК» уменьшение угла наклона заплечиков, увеличение отношения высоты горна к его диаметру наряду с другими мероприятиями привело к снижению потерь чугуна со шлаком и уменьшению удельного расхода кокса в следствие уменьшения количества образовавшихся карбидов титана. Поэтому при реконструкции доменных печей ОАО «ЕВРАЗ НТМК» было принято решение об увеличении этого соотношения до 0,47. Практика эксплуатации реконструированных доменных печей подтвердила правильность выбранной стратегии реконструкции, а именно, изменения профиля печи.

Химический состав титаномagnetитовых руд и их концентратов по существу полностью определяет технологию последующей металлургической переработки железорудного сырья. Она во многом зависит от *содержания титана в шихте*. При разработке Качканарского месторождения содержание титана в шихте возрастет, что приведет к увеличению концентрации оксида титана в шлаке и, как следствие, карбида титана (см. уравнения 1, 2 в таблице 1).

Полученные результаты расчета показали, что увеличение содержания оксида титана в пустой породе шихтовых материалов вызывает увеличение равновесной концентрации карбида титана, а вот объем восстановленного титана, мало зависит от исходной концентрации  $TiO_2$ .

Было проанализировано влияние технологических параметров доменной плавки и конструкции нижней зоны доменной печи на процесс карбидообразования при увеличении концентрации оксида титана в шлаке. В таблице 3 показано, во сколько раз необходимо изменить характеристики доменного процесса для поддержания постоянной равновесной концентрации карбида титана при условии возрастания содержания оксида титана в шлаке на 1%.

Таблица 3 – Необходимое изменение величины технологического фактора для поддержания постоянной равновесной концентрации карбида титана при условии возрастания содержания оксида титана в шлаке на 1%

Фактор	Требуемое изменение, доли ед.
Угол наклона заплечиков доменной печи	0,97
Основность шлака	1,04
Средний диаметр кусков кокса	1,11
Давление в доменной печи	1,15
Содержание MnO в шлаке	1,48

Таким образом, успешная выплавка ванадиевого чугуна при условии возрастания содержания оксидов титана в шихте и, соответственно, в шлаке может быть реализована за счет повышения качества кокса и увеличения давления в доменной печи, а также добавления марганецсодержащих материалов в шихту.

Известно, что карбиды титана могут разрушаться при взаимодействии с *оксидами марганца и железа*. Поэтому одним из способов борьбы с карбидными образованиями титана является повышение окисленности шлака за счет увеличения в нем концентрации оксидов железа (FeO) и марганца (MnO).

В условиях ОАО «ЕВРАЗ НТМК» в качестве марганецсодержащих материалов используют марганцевый агломерат, а основного железорудного материала – высокоосновной агломерат и неофлюсованные окатыши Качканарского ГОКа в соотношении 40 и 60 % соответственно. Однако оксид железа легко восстановим, количество его ограничено и не существует способа его подачи в большом количестве.

Термодинамический анализ показал, что разрушение карбида титана оксидами марганца и железа идет с образованием монооксида титана.

Зависимость концентрации оксида титана от содержания MnO и FeO в шлаке показана на рисунок 13. Полученные данные позволяют сделать вывод о том, что наличие оксида марганца в шлаке в большей степени способствует разрушению карбидов титана, чем оксида железа.

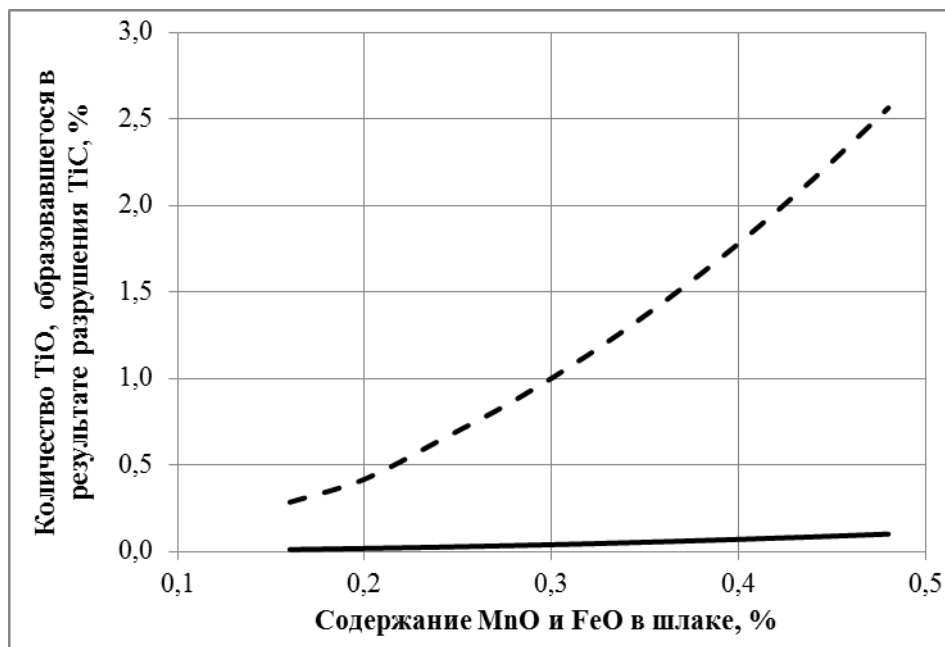


Рисунок 13 – Влияние MnO (– – –) и FeO (—) на концентрацию TiO, перешедшего в шлак в результате разрушения карбида титана

Разрушение карбида титана происходит с увеличением объема газов, поэтому на процесс существенное влияние оказывает давление в печи (рисунок 14).

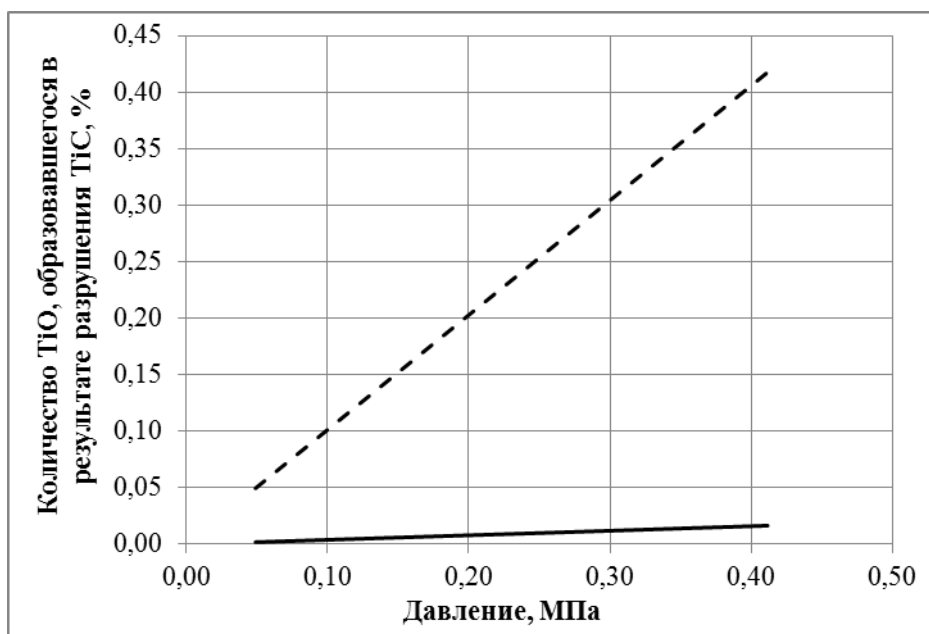


Рисунок 14 – Влияние давления на концентрацию TiO, перешедшего в шлак в результате взаимодействия карбида титана с MnO (– – –) и FeO (—)

Увеличение давления в доменной печи в большей степени способствует разрушению карбида титана при взаимодействии его с оксидом марганца.

Количество вводимого марганецсодержащего материала в шихту доменной печи определяется требованиями получения товарного ванадиевого шлака, производимого в конвертерном цехе. Содержание марганца в чугуна не должно превышать 0,40 – 0,45 %. Содержание марганца при плавке агломерата и окатышей Качканарского ГОКа составляет около 0,2 %. Таким образом, для достижения допустимого содержания марганца в чугуна возможен ввод в шихту марганецсодержащих компонентов.

### Заключение

Диссертационная работа посвящена изучению особенностей поведения титана в доменной печи при выплавке чугуна из титаномagnetитового сырья путем совместного решения задач теплообмена и кинетики реакций восстановления титана и кремния из оксидов.

Выполненный анализ физико-химических процессов, протекающих при доменной плавке ванадийсодержащего титаномagnetитового сырья, позволил сформулировать следующие выводы:

1. Установлено, что доминирующим фактором в процессе карбидообразования является время пребывания оксидного расплава в области высоких температур.

2. Разработана новая методика оценки влияния технологических факторов и конструкции печи на время пребывания расплава в области высоких температур.

3. Разработана математическая модель тепло- и массообмена в нижней зоне доменной печи, которая позволяет количественно оценить влияние технологических режимов доменной плавки и конструктивных особенностей печи на процессы восстановления.

4. Показано, что давление в доменной печи позволяет не только сместить равновесие реакций восстановления, но и увеличить интенсивность плавки, сократить время пребывания расплава в области высоких температур.

5. Установлено, что качество кокса, которое определяется его горячей прочностью является одним из основных факторов, обеспечивающих высокоэффективную работу доменной печи. Показано, что при увеличении горячей прочности кокса существенно снижается время пребывания расплава в нижней зоне доменной печи, уменьшается прогрев шлака и кокса, что позволяет снизить содержание кремния и, соответственно, титана в чугунах, уменьшить вероятность образования карбидных фаз.

6. С использованием разработанной модели показано, что конструкция горна доменной печи и угол наклона запечников оказывает существенное влияние на развитие теплообмена и физико-химических процессов, что позволяет сформировать научный подход к выбору профиля печи.

7. Увеличение давления в доменной печи и горячей прочности кокса, повышение основности шлака, уменьшение угла наклона запечников печи позволяют сократить протяженность зоны восстановления титана, а, следовательно, и время пребывания оксидного расплава в области высоких температур, уменьшить вероятность образования карбидных фаз.

Полученные количественные зависимости между технологическими режимами доменной плавки, конструктивными параметрами печи и развитием процессов восстановления кремния и титана из оксидов могут быть использованы как при проектировании новых доменных печей, так и при переводе существующих доменных печей на работу с повышенным содержанием оксида титана в шихтовых материалах.

**Основное содержание работы отражено в следующих публикациях:**

Основное содержание работы отражено в следующих научных статьях, опубликованных в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. О.Н. Собянина, С.В. Филатов, С.А. Загайнов. Анализ условий движения расплава в горн доменной печи при плавке титаномагнетитов // Известия ВУЗов. Черная металлургия. 2008. № 4. С. 69 – 70.

2. О.Н. Собянина, С.В. Филатов, С.А. Загайнов. Анализ особенностей восстановления титана в доменной печи // Сталь. 2012. № 3. С. 9-11.

В других изданиях:

3. О.Н. Собянина, С.А. Загайнов. Особенности движения расплава в горне доменной печи при плавке титаномагнетитового сырья // Сборник трудов XIII отчетной научной конференции молодых ученых УГТУ-УПИ, Екатеринбург. 2007. Изд-во УГТУ-УПИ. С.230-232.

4. О.Н. Собянина, С.А. Загайнов. Термодинамический анализ условий восстановления титана в горне доменной печи // сборник трудов XIII отчетной научной конференции молодых ученых УГТУ-УПИ, Екатеринбург. 2007. Изд-во УГТУ-УПИ. С.227-229.

5. А.В. Кушнарев, С.В. Шаврин, С.А. Загайнов, О.Н. Собянина [и др.]. Реализация мероприятий по снижению содержания титана в чугунах // Сборник трудов Международной конференции, посвященной улучшению качества транспортного металла, Нижний Тагил. 2007. Изд-во ОАО «НТМК». С. 121-123.

6. С.А. Загайнов, О.Н. Собянина, В.В. Филиппов [и др.]. Анализ доменной плавки при производстве ванадиевого чугуна // Сборник трудов Международной научно-практической конференции «Повышение качества образования и научных исследований» в рамках VII Сатпаевских чтений, Экибастуз. 2008. Изд-во Экибастузского инженерно-технического института им. Академика Сатпаева. С.370-371.

7. А.В. Кушнарев, С.В. Шаврин, С.А. Загайнов, О.Н. Собянина [и др.]. Реализация мероприятий по снижению содержания титана в чугунах // Сборник трудов 3-й Международной конференции «Трансмет-2007», Екатеринбург. 2008. Изд-во УГТУ-УПИ. С.169-171.

8. С.А. Загайнов, О.П. Онорин, О.Н. Собянина [и др.]. Исследование работы агрегатов и систем доменной печи № 5 и разработка технологии производства ванадиевого чугуна // Бюллетень «Черная металлургия», ОАО «Черметинформация». 2008. № 7. С. 70.

9. С.А. Загайнов, О.П. Онорин, О.Н. Собянина [и др.]. Разработка и выдача рекомендаций по стабилизации состава продуктов плавки при выплавке

ванадиевого чугуна // Бюллетень «Черная металлургия», ОАО «Черметинформация». 2008. № 7. С. 70.

10. А.В. Кушнарев, С.В. Филатов, С.А. Загайнов, О.Н. Собянина [и др.]. Внедрение технологии выплавки низкокремнистых чугунов на НТМК // Сборник трудов 8-й научно-практической конференции «Новые перспективные материалы, оборудование и технологии для их получения» и 6-й научно-практической конференции «Современные технологии в области производства и обработки цветных металлов», Москва. 2010. Министерство промышленности и торговли. С.214-219.

11. С.Е. Собянин, О.Н. Собянина, В.С. Швыдкий [и др.]. Математическая модель теплообмена в ванне плавильной печи // Материалы 10-й Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов, специалистов, Магнитогорск. 2009. С.40-43.

12. Sergei A. Zagainov, Sergei V. Filatov, Olga N. Sobjanina, Yakov M. Gordon. Technological solutions' for intensive production of low silicon hot metal in blast furnace processing vanadium containing titania-magnetite // Technical contribution to the 6th International Congress on the Science and Technology of ironmaking – ICSTI, 42nd International Meeting on ironmaking and 13th International Symposium on iron Ore, Rio de Janeiro, Brazil. 2012. PP. 1406- 1415.

13. С.А. Загайнов, С.В. Филатов, О.Н. Собянина [и др.]. Использование закономерностей теплообмена для поиска пути форсирования доменной плавки // Сборник докладов Международной научно-практической конференции, Екатеринбург. 2012. Изд-во УРФУ им. Первого Президента России Б.Н. Ельцина. С.89-93.

14. O.N. Sobyana, S.V. Filatov, S.A. Zagainov. Analysis of Titanium Reduction in a Blast Furnace // Steel in Translation. 2012. Vol.42. No 3. PP.246-248.